

Multimodale und Multiskalare dreidimensionale Materialcharakterisierung von faserverstärkten Kunststoffen mit Röntgen-Computertomografie

Markus HÖGLINGER¹, Bernhard PLANK¹, Jonathan GLINZ¹, Joachim SCHULZ²,
Christoph HEINZL¹, Johann KASTNER¹

¹ FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH, Wels, Österreich

² Microworks GmbH, Karlsruhe, Deutschland

Kontakt E-Mail: markus.hoeglinger@fh-wels.at

Motivation

Die Motivation hinter dieser Arbeit liegt in der frühzeitigen Erkennung von Defekten wie Poren oder Rissen mit Hilfe von multimodalen und multiskalaren Methoden. Durch einen multiskalaren Ansatz kann gezeigt werden, dass bei niedrigeren Auflösungen Risse mit einer Breite unter der Voxelgröße bereits qualitativ erkannt werden können. Zur Verifizierung der Ergebnisse werden diese Bereiche der Bauteile mit einer höheren Auflösung als Referenz tomografiert. Multimodale Bauteilcharakterisierung kann auf unterschiedliche Art und Weise durchgeführt werden. Beispiele dafür sind zusätzlich zur Röntgen-Computertomografie (XCT) noch Aufnahmen aus Ultraschall- oder Thermografie Messungen. Ein moderner Ansatz, welcher auch in dieser Arbeit angewendet wurde, verwendet die Talbot-Lau-Gitterinterferometrie (TLGI), um zusätzlich zum Absorptionskontrast (AC) noch weitere Modalitäten, wie Phasenkontrast (PC) oder Dunkelfeldkontrast (DFC), die die Brechung bzw. Streuung der Röntgenstrahlen durch kleine Strukturen und Materialgrenzen darstellt, zu erfassen. Dieser zusätzliche, durch die Gitterinterferometrie erhaltene, Röntgen-Kontrastmechanismus resultiert in einer erhöhten Sensitivität bezüglich Inhomogenität und Defekte. Durch die zusätzlichen Modi können auch Micro-Risse in belasteten Bauteilen detektiert werden, die mit konventionellen XCT-Messungen kaum erkennbar sind. [1]

Experiment

Für die multiskalare XCT wurde eine CFK-Probe aus einem Forschungsprojekt im Bereich der Luftfahrtindustrie gewählt. Der Überblicksscan wurde an einem RayScan 250E CT-Gerät durchgeführt und für den Detailscan wurde ein für höhere Auflösungen geeignetes GE phoenix Nanotom 180 NF CT-Gerät herangezogen.

Die Verwendung eines Talbot-Lau Gitterinterferometers für multimodale Experimente erlaubt neben dem Absorptionskontrast die Extraktion zweier zusätzlicher Modalitäten, dem Phasenkontrast und Dunkelfeldkontrast. Das Gitterinterferometer wurde ebenfalls im RayScan 250E implementiert. Zur Veranschaulichung der Methode wurden Radiografiebilder eines vorgeschädigten und eines unbeschädigten CFK-Winkels aufgenommen. Auswertung und Analyse der verschiedenen Messungen wurden in VGStudio MAX 3.4.2 (Volume Graphics GmbH) durchgeführt. [2][3]



Ergebnisse

Durch die multiskalare Charakterisierung kann verifiziert werden, dass Defekte kleiner als die Voxelgröße bereits qualitativ detektiert werden können (Abb. 1). Während der Übersichtsscan bei einer Auflösung von $151 (\mu\text{m})^3$ VS durchgeführt wurde, und die Auflösung des Detailscans bei $17 (\mu\text{m})^3$ VS lag, wies der deutlich erkennbare Riss eine Breite von $102 \mu\text{m}$ auf.

Durch die multimodale Charakterisierung können vorhandene Defekte mit den verschiedenen Modalitäten unterschiedlich gut identifiziert werden (Abb.2). [4]

Dadurch zeigt sich, dass die Risse im vorgeschädigten CFK-Winkel (jeweils oben) mit Hilfe des Dunkelfeldkontrastes deutlich kontrastreicher dargestellt sind. Da es sich bei den aufgenommenen Bildern um reine Radiographie-Aufnahmen handelt, können diese Untersuchungen deutlich schneller als herkömmliche XCT-Scans zu aussagekräftigen Ergebnissen führen.

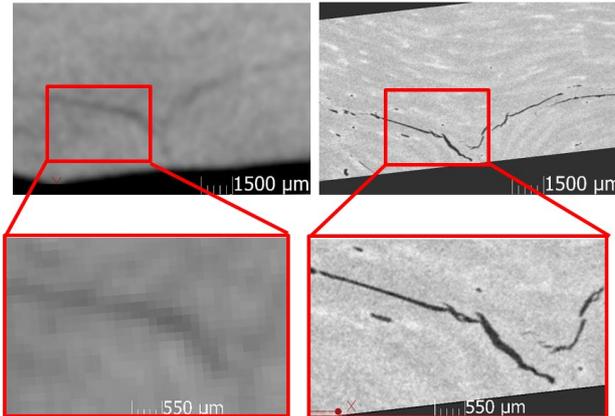


Abb.1: Ergebnis der multiskalaren Messung eines Risses in einem CFK-Bauteil

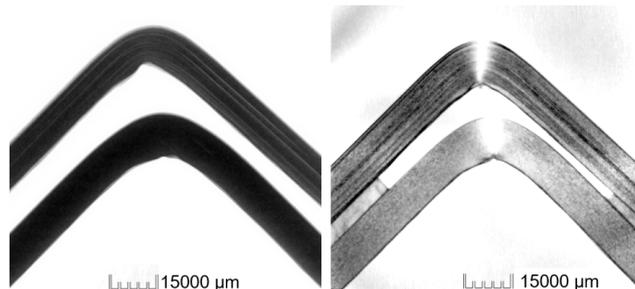


Abb.2: AC des RayScan 250E (links) und DFC als Modalität aus der Talbot-Lau Gitter-Interferometrie (rechts); Ergebnisse des Vergleichs eines unbeschädigten CFK-Winkel (jeweils unten) mit einem vorgeschädigten CFK-Winkel (jeweils oben)

Diskussion

Der Zweck dieser Arbeit war der Vergleich verschiedener Auflösungen und Modalitäten anhand von CFK-Proben. Der multiskalare Ansatz zeigt deutlich, dass Strukturen unter der Auflösungsgrenze bereits erkannt werden. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, können in diesen Bereichen dadurch gezielt Region of Interest - Scans durchgeführt und die Defekte mit der höheren Auflösung verifiziert werden. Gerade für größere Bauteile ist diese Einschätzung bei niedriger Auflösung relevant.

Durch den erhöhten Kontrast und die sub-Voxel - Sensitivität im Dunkelfeldkontrast des TLGI können besonders Mikrorisse frühzeitig gegenüber dem Absorptionskontrast erkannt werden. Der Vorteil zu herkömmlichen Computertomographie – Methoden liegt hier in der Messdauer. Während bei CT- Aufnahmen das gesamte Bauteil vollständig rotieren muss um derartige Risse erkennbar darstellen zu können, reicht beim Dunkelfeldkontrast des Talbot-Lau Interferometers eine einzelne Radiographie-Aufnahme zur qualitativen Einschätzung.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen des Projektes „BeyondInspection – Digitalisierungsplattform zur prädikativen Bewertung von Luftfahrtbauteilen mittels multimodaler multiskalärer Inspektion“ des TAKE OFF Programms finanziert. Projektnummer: 874540

Referenzen

- [1] B. Plank et al., Multiscale and Multimodal Approaches for Three-dimensional Materials Characterisation of Fibre Reinforced Polymers by Means of X-ray based NDT Methods, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography, 2019, Fürth.
- [2] C. Heinzl et al., Processing analysis and visualization of CT data, Industrial X-Ray Computed Tomography, 99-142
- [3] VolumeGraphics. VGStudio MAX 3.4.2. <https://www.volumegraphics.com>
- [4] J. Kastner, C. Heinzl, X-ray tomography, Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation, 1095-1166

Multimodale und Multiskalare dreidimensionale Materialcharakterisierung von faserverstärkten Kunststoffen mit Röntgen-Computertomografie

Markus Höglinger¹, Bernhard Plank¹, Jonathan Glinz¹, Joachim Schulz², Christoph Heinzl¹, Johann Kastner¹
¹ Forschungsgruppe Computertomographie, FH OÖ Fakultät für Technik und Angewandte Naturwissenschaften
² Microworks GmbH, Karlsruhe, Deutschland

Motivation

Die Motivation hinter dieser Arbeit liegt in der frühzeitigen Erkennung von Defekten wie Poren oder Risse mit Hilfe von multimodalen und multiskalaren Methoden. Durch einen multiskalaren Ansatz kann gezeigt werden, dass bei niedrigeren Auflösungen Risse mit einer Breite unter der Voxelgröße bereits qualitativ erkannt werden können. Zur Verifizierung der Ergebnisse werden die Bauteile mit einer höheren Auflösung als Referenz tomografiert.

Multimodale Röntgen-Computertomografie (XCT) kann auf unterschiedliche Art und Weise durchgeführt werden. Ein moderner Ansatz verwendet Talbot-Lau-Gitterinterferometrie (TLGI), um zusätzlich zum Absorptionskontrast (AC) noch weitere Modalitäten, wie Phasenkontrast (PC) oder Dunkelfeldkontrast (DFC) zu erfassen. Durch die zusätzlichen Modi können auch Mikro-Risse in belasteten Bauteilen detektiert werden, die mit konventionellen XCT-Messungen kaum erkennbar sind.

Experiment

Multiskalare Materialcharakterisierung: Für die multiskalare XCT wird bei größeren Bauteilen zusätzlich zum Übersichtsscan bei geringerer Auflösung noch ein hochauflösender Scan eines Ausschnittes aufgenommen (Abb.1: links). Dafür wurde eine CFK-Komponente aus einem Forschungsprojekt im Bereich der Luftfahrtindustrie gewählt. Der Überblicksscan wurde an einem RayScan 250E CT-Gerät durchgeführt und für den Detailscan wurde ein für höhere Auflösungen geeignetes GE phoenix Nanotom 180 NF herangezogen.

Multimodale Materialcharakterisierung: Die Verwendung eines Talbot-Lau Gitterinterferometers erlaubt neben dem Absorptionskontrast die Extraktion zweier zusätzlicher Modalitäten, dem Phasenkontrast und Dunkelfeldkontrast. (Abb.1: rechts). Damit kann die Brechung bzw. Streuung der Röntgenstrahlen, z.B. an Mikrorissen, visualisiert werden. Das Gitterinterferometer wurde ebenfalls im RayScan 250E implementiert. Zur Veranschaulichung der Methode wurden Radiografiebilder eines vorgeschädigten und eines unbeschädigten CFK-Winkels aufgenommen. Auswertung und Analyse der verschiedenen Messungen wurden in VGStudio MAX 3.4.2 (Volume Graphics GmbH) durchgeführt.



Abb. 1: Bauteilausschnitt für multiskalare Charakterisierung (links), Aufbau des Talbot-Lau Gitterinterferometers zur multimodalen Charakterisierung (rechts)

Ergebnisse

Durch die multiskalare Charakterisierung kann verifiziert werden, dass Defekte kleiner als die Voxelgröße bereits qualitativ detektiert werden können (Abb. 2). Während der Übersichtsscan bei einer Auflösung von 151 (μm)³ VS durchgeführt wurde, und die Auflösung des Detailscans bei 17 (μm)³ VS lag, wies der deutlich erkennbare Riss eine Breite von 102 μm auf.

Durch die multimodale Charakterisierung können vorhandene Defekte mit den verschiedenen Modalitäten unterschiedlich gut identifiziert werden (Abb.3). Dabei zeigt sich, dass die Risse im vorgeschädigten CFK-Winkel (jeweils oben) mit Hilfe des Dunkelfeldkontrastes deutlich besser erkennbar sind.

Da es sich bei den dargestellten Bildern um reine Radiographie-Aufnahmen handelt, können diese Untersuchungen deutlich schneller als herkömmliche XCT-Scans zu aussagekräftigen Ergebnissen führen.

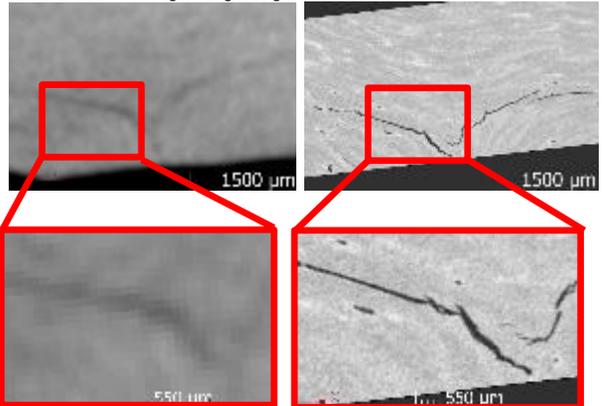


Abb. 2: Ergebnis der multiskalaren Messung eines Risses in einem CFK-Bauteil



Abb. 3: AC des RayScan 250E (links) und DFC als Modalität aus der Talbot-Lau Gitterinterferometrie (rechts); Ergebnisse des Vergleichs eines unbeschädigten CFK-Winkel (jeweils unten) mit einem vorgeschädigten CFK-Winkel (jeweils oben)

Diskussion

Der Zweck dieser Arbeit war der Vergleich verschiedener Auflösungen und Modalitäten anhand von CFK-Proben. Der multiskalare Ansatz zeigt deutlich, dass Strukturen unter der Auflösungsgrenze bereits erkannt werden. Um Fehlinterpretationen zu vermeiden, können in diesen Bereichen dadurch gezielt Region of Interest - Scans durchgeführt und die Defekte mit der höheren Auflösung verifiziert werden. Gerade für größere Bauteile ist diese Einschätzung bei niedriger Auflösung relevant.

Durch den erhöhten Kontrast und sub-Voxel Sensitivität im Dunkelfeldkontrast des TLGI können besonders Mikrorisse frühzeitig gegenüber dem Absorptionskontrast erkannt werden. Der Vorteil zu herkömmlichen Computertomographie – Methoden liegt hier in der Messdauer. Während bei CT-Aufnahmen das gesamte Bauteil vollständig rotieren muss um derartige Risse erkennbar darstellen zu können, reicht beim Dunkelfeldkontrast des Talbot-Lau Interferometers eine einzelne Radiographie-Aufnahme zur qualitativen Einschätzung.

Danksagung

Diese Arbeit wurde durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) im Rahmen des Projektes „BeyondInspection – Digitalisierungsplattform zur prädikativen Bewertung von Luftfahrtbauteilen mittels multimodaler multiskalärer Inspektion“ des TAKE OFF Programms finanziert. Projektnummer: 874540

Referenzen

- B. Plank et al., Multiscale and Multimodal Approaches for Three-dimensional Materials Characterisation of Fibre Reinforced Polymers by Means of X-ray based NDT Methods, International Symposium on Digital Industrial Radiology and Computed Tomography. 2019, Fürth.
- J. Kastner, C. Heinzl, X-ray tomography, Handbook of Advanced Nondestructive Evaluation, 1095-1166
- C. Heinzl et al., Processing analysis and visualization of CT data, Industrial X-Ray Computed Tomography, 99-142
- VolumeGraphics. VGStudio MAX 3.4.2. <https://www.volumegraphics.com>

Kontakt

Dipl.Ing. Markus Höglinger
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH,
Stelzhamerstraße 23, A-4600 Wels,
Tel. 050804-44425; markus.hoeglinger@fh-wels.at, www.3dct.at,